火の鳥「はやぶさ」未来編 その19 ~ Hayabusa2 DCAM3 デジタル系の開発~

小川 和律¹, 白井 慶², 澤田 弘崇², 荒川 政彦¹, 本田 理恵³, 石橋 高⁴, 和田 浩二⁴, 門野 敏彦⁵, 坂谷 尚哉², 中澤 暁², 早川 基²

(要旨)小型・分離型のカメラシステムDCAM3(分離カメラ)は、Hayabusa2が小惑星 Ryugu上で衝突実験 を行う際に探査機から分離され、近傍から衝突の観測を行なった。DCAM3は、イジェクタ飛散の詳細な様 子を高い空間分解能で撮影するための科学観測用カメラシステム「デジタル系(DCAM3-D)」を持つ、このデ ジタル系は、Hayabusa2がより高いレベルの科学目的を達成するために遅れて搭載が決定されたもので、提 案から開発・完成に至るまでの全てが険しい道のりだった。様々な課題を克服して成功を収めた成果は挑戦 的な科学観測機器の開発の重要性を訴えている。

1. はじめに

DCAM(Deployable Camera: 分離カメラ)とは, 惑 星探査機本体から分離された後に. 探査機から離れた 場所で可視光撮像を行い、無線通信によってデータを 探査機に送るというコンセプトを持つ,大きさ10 cm 程度の小型・分離型のカメラシステムのことである. IAXA エンジニアの澤田弘崇が中心となって開発し. 現在までDCAM1からDCAM3までの3機が実際に探 査機に搭載された. DCAM1・DCAM2はソーラ電力 セイル実証機IKAROSの本体から放出され、宇宙空 間でIKAROSが正しく帆を張ったかどうかを確認す る役目を果たした. DCAM3は小惑星探査機 Havabusa2に搭載されて、同じく探査機から分離され る SCI (Small Carry-on Impactor: 衝突装置) [1] が小惑 星衝突実験を行う様子を間近で観測する役目を担った (図1). この時, Havabusa2本体はSCIの爆発片や衝 突イジェクタの直撃を避けるために小惑星の裏側遠方 に退避するので、衝突の瞬間を観測することができな

1. 神戸大学

- 3. 高知大学
- 4. 千葉工業大学
- 5. 産業医科大学
- kazunori.ogawa@topaz.kobe-u.ac.jp

い. DCAM3は衝突~イジェクタ飛散の様子を確認す る唯一の手段である.

DCAM3はその小さい筐体の中に、リアルタイム性 を重視したモニタカメラと、衝突イジェクタの詳細な 様子を記録するための高空間分解能な科学観測用カメ ラの2種類を内蔵していて、カメラの出力方式の違い から前者をアナログ系(DCAM3-A)、後者をデジタル 系(DCAM3-D)と呼んでいる.このうちデジタル系は Hayabusa2開発期間の後期になって追加で実装が決定 したもので、その生い立ちと開発には様々な困難と紆 余曲折があった.以下では、恐らくHayabusa2の中 でも最も特異な機器である、この「DCAM3デジタル 系」がこれまで辿ってきた道のりを紹介したい、それ は小型で目立たないが、科学観測機器としてゼロから 開発し、リスクの高い挑戦的機器として成功した、近 年では稀な機器である.このことは理学分野での観測 機器開発の重要性を投げかけている.

2. 事の起こり

2011年夏, Hayabusa2は既に計画が認可され, 探 査機や搭載機器の検討・開発が進んでいた. 特に小惑 星地下物質を掘り起こす目的で, Hayabusa初号機に は無いSCIの搭載と, それを使って行う衝突実験が大

^{2.} 宇宙航空研究開発機構



図1:DCAM3デジタル系が撮影したRyugu上でのSCI衝突実験前後の画像(2019年4月5日).(左)SCI作動の約185秒前.Ryugu 上空にSCI本体が見える.(右)SCI作動の約3秒後.着弾と同時にイジェクタが噴出し始める様子が確認できた.以降の 時間帯の画像は,順次探査機から地上へ送信して,解析を進めている.(画像のクレジット:JAXA,神戸大,千葉工大, 高知大,産業医科大)

きな目玉となっており,工学的な挑戦に注目が集まっ た.一方で,探査計画の理学目的とその重要性の検討 がまだ手薄であるとの指摘が宇宙科学研究所(ISAS) 内外から出されており,理学側の体制強化が課題であ った.これを克服するには国内の惑星科学者から更な る協力を得ることが必須だが,当時の固体惑星探査は 現在ほど学会に浸透しておらず,簡単ではなかった. それは日本の固体惑星探査が未だ駆け出しで, Hayabusa初号機は工学実験探査機として理学研究者 が少数参加するに留まり,次の月周回衛星Kaguyaが 固体惑星系の科学探査としてようやく成功を納めた状 態だったからである.科学コミュニティから見れば, 固体惑星探査はISASを中心とする一部の関係者が行 うもので,情報共有と協力関係が圧倒的に不足してい た.

この課題に対して目論んだことの一つは、天体衝突 現象の専門家で、かつ科学コミュニティに多くの繋が りを持つ研究者らをSCI衝突実験の理学検討に加える ことだった、その説得で鍵となったのは、DCAM3に よる衝突現象の科学観測である。SCIによって作られ るクレータの観測に加えて、衝突の瞬間に発生する衝 突イジェクタを詳細に観測できれば、それは世界的に 類を見ない新しいデータを得る絶好の機会で、SCIの 衝突実験に天体衝突科学の先鋭的な意義を与える。特 にイジェクタコーンの高さ・幅・角度を正確に知るこ とがクレータスケール則の検証と小惑星表層の物理状 態の推定のために必要だった(詳しくは[2,3]を参照さ れたい).しかし当時のDCAM3は,理学ではなく工 学を目的とした,いわゆる工学機器として設計が進ん でおり,限られた予算の中でDCAM1,2の設計を極力 流用し,SCI衝突弾丸の小惑星着弾の有無を確認する 目的に特化したカメラ(現在のアナログ系)のみの構成 となっていた.これではイジェクタの詳細観測には撮 像性能が足りない.斯くして,緊急にイジェクタの科 学観測に耐えるカメラの検討を始めることになった.

3. 検討と提案,動乱,搭載決定まで

新しいカメラシステムには、高解像度のモノクロ CMOSイメージセンサと高性能レンズを使い、また 無線通信にはその画品を落とすことなく探査機に伝え る高速デジタル通信を採用する方針として、これらの 概念検討を急ピッチで進めて搭載を提案することにな った.しかしこの時点でDCAM3は全体の基本設計を 終えていたので、その全てをひっくり返す提案が容易 に承諾されないことは想像に難くない、事実、これに はDCAM3の開発責任者である澤田はもとより、プロ ジェクト全体が難色を示し、大変に揉めた、新カメラ の検討チームは、前述の通りデジタルカメラシステム の搭載がHayabusa2理学の強化の要だと信じて、覚



図2: Hayabusa2衝突実験の弾丸射出時におけるSCI, DCAM3, 小惑星の位置関係.



図3: DCAM3分離カメラ部の構造. 突起部を除く円筒形筐体のサイズは Φ80 x 78 mm.

悟を持って主要関係者のもとに日参し、時には「理学 こそ正義」と揺すったり、時には泣き落としながら、 あの手この手で説得と調整を試みた、何とも迷惑な話 であったと思う、しかしその実は、澤田こそ一見意に 介さない姿勢の裏で理学側の度を超えた提案を真面目 に検討し、現実的な解を模索していたのである。

当時, 我々の取れる道は3つあった. すなわち(a) 既存のDCAM3を全て撤廃して新しいカメラシステム に置き換える. これはシンプルで電気設計がしやすく, サイズ・重量も節約できるが、ほぼ全てが新たな設計 になる.(b)DCAM3を拡張して新しいカメラシステ ムと無線通信機を追加する.これは構造が複雑でサイ ズ・重量が増えるが、新旧カメラが目的の一部を共有 する冗長系になる.あるいは(c)あきらめる.方針は しばらく(a)と(b)の間で揺れた.どちらを選択する にせよ、それまで積み上げたものの大部分を崩すこと になるので、関係者全員の目的意識を徐々に同じ方向 に向くよう修正していく中で、明に暗に多くの葛藤と 攻防があったことを覚えている. 無数の調整と数回の 有識者会議を経て,既存設計の一部を流用でき,また 冗長性を持つことを評価して,最終的に上記(b)を採 用することになった. さらに,カメラと無線通信の方 式の違いにより既存系統をアナログ系,新しい系統を デジタル系と呼び分けて,両者は筐体と電源のみを共 有ながら完全に独立な電気系統を持つこととした.

最後の山場は、デジタル系の追加搭載と、それに伴 うDCAM3の抜本的な設計変更をプロジェクトに正式 に認めてもらうことである.これにはDCAM3の詳細 設計審査(CDR)まで待たねばならなかった.デジタ ル系の科学的重要性の浸透に時間を要したことと、新 しいDCAM3の技術的成立性が不透明だったことが理 由である.これらの説明のため審査会でDCAM3チー ムが準備した資料は600ページ以上に及んだ.このよ うな経緯を経て、2013年の始め、新しいDCAM3の 搭載がついに正式に決定した.

4. 苦難の設計-あと100ミクロンだけ

DCAM3は複雑なシステムである。分離される小型 カメラユニットには電源系.アナログ系・デジタル系 それぞれのカメラ・制御部・無線送信機・アンテナが あり、自動観測や画像圧縮の機能なども持つ、探査機 本体の側では、カメラユニットを比較的高速(0.7 m/s)に分離・放出して、同時に姿勢安定用のスピン を与える分離機構を始め,受信アンテナ,無線受信機, システム全体の制御ユニットと大容量データストレー ジがあり、自動シーケンスやメモリパトロールの機能 も持つ. サンプラホーンモニタカメラ(CAM-H)も DCAM3アナログ系の一部である。DCAM3は探査機 本体から分離後、分離カメラ側と探査機側の各コンポ ーネントが息を合わせて自動で衝突現象の撮像を行な っていく.このようなシステムにデジタル系を追加で 共存させたことはDCAM3全体で様々な課題を呼び起 こした.

デジタル系システム内の開発課題も無数にあったが、 その全てを紹介することは困難なため、以下にその中 の幾つかのエピソードを紹介する.特に初期の課題と なったのはSCIの視認問題である.まず図2にSCI弾 丸射出時のDCAM3の観測条件を示す.弾丸は指定時 刻にSCIの作動によって射出され、小惑星上の地球直 下点 ± 200 mの範囲のどこかに着弾する. DCAM3 は これを側面の約1 km 遠方から観測することになる. なお. 撮像した画像は探査機本体に順次無線送信され る. SCIとDCAM3は探査機本体からの分離時に初速 度誤差があるため、SCI作動時にはそれぞれおよそ図 に示す範囲のどこかに存在する. 科学目的のためには 弾丸の衝突角度を決定することが必要なので. DCAM3はこの範囲のどこに居たとしても、SCI作動 後のイジェクタコーンに加えて、作動直前のSCI本体 を視野に収めて検出できることが条件になる。しかし SCI本体は存在範囲が広い上に小型で検出が難しく. 加えてDCAM3は姿勢安定のために視線軸回りに約 100 deg/secで回転させるので露光時間を長く取ると 画像が滲んでしまう. そのため広角で明るく結像性能 が高い、かつ小型軽量な特別な光学系が必要だった. 最終的にこの部分はコスト配分を高めて、非球面レン ズを用いて設計・製作することで、視野角74°×74°. F1.7, 結像性能(2×2-pixels ensquared energy)>50 %をΦ30×43 mmの小型サイズで実現した.

同時に問題となったのは、やはり小型化だった.探 査機全体の設計が既に進んでいたためDCAM3システ ムに与えられた体積は変更できない. 前述の通りアナ ログ系・デジタル系の同居を方針としたので、特に分 離するカメラの内部では、電池を共有しつつ、光学系、 イメージセンサ,電源用基板,制御用基板,通信用基 板のアナログ系・デジタル系の2セット分を直径7 cm の円筒形の筐体内に配置しなければならない(図3). 光学系とセンサは必要な撮像性能を満たす以上は小型 化に限度があるので、課題は電子基板の小型化に集約 される.これは実際には開発期間.開発コスト.基板 のノイズ耐性・放射線耐性とのトレードオフになるた め、全体配置を調整しながらサイズの落とし所を探る 作業である.これは協力メーカ、またアナログ系側と の膨大な調整と試行錯誤を要する、最も苦労した課題 になった. 最終的には、 筐体設計を担当する澤田に円 筒形筐体の直径を8 cmに拡大することを許容しても らい何とか収めることができたが、終盤では「あと 100ミクロンだけください」などと涙ながらに嘆願す ることになった。出来上がった電子基板は端をヤスリ で削るなど、ミクロンオーダーまで小型化に務めた.

厳しい小型化と低コストの要求のため,デジタル系 の主要な電子部品には宇宙グレードではなく産業用部 品を用いた. これは電子基板の小型化・省電力化に有 効だが、一方で幾つかの問題への対処が必要となる、 その一つは耐環境性(特に放射線への耐性)の検証と保 証が不十分なことである。 基板設計・製作に当たって は全ての電子部品に対して独自に放射線照射試験を行 って耐性を確認したが、偶発的に発生することが避け られないラッチアップ¹とアップセット²のリスクに対 しては,発生確率を試験で確認したのち,設計で対処 した. ラッチアップに関して、DCAM3はSCI衝突の 前後数時間のためだけに存在する機器で、この間は何 が起きても観測を停止するわけにはいかない. そのた め電源部に過電流検知回路を追加して、ラッチアップ 発生時は自動で電源停止・再起動されるようにし、ま た自動観測中の状態を常に不揮発メモリ記録しておき. 再起動されると観測シーケンスの続きを自発的に再開 する機能を実装した、アップセットに関しては、まず デジタル系は数時間の観測で1 GB以上のデータを得 る. 探査機本体のデータレコーダは容量が小さく使用 できない上,全てを地球に送信するには長期間必要な ので、独自に大容量の不揮発メモリを持たせた、その 上で、データを長期保存する間にアップセットのリス クがあるため、全データを三重冗長で記録し、さらに 多数決でビット反転を修復するメモリパトロール機能 を実装した.

新しいDCAM3の設計では1つだけ妥協しなければ ならなかったものがある.それはアンビリカルケーブ ルである.もともとDCAM3は「可能な限りシンプル に」というコンセプトから,分離カメラ部と分離機構 との間は電気的な結線(アンビリカル)が無く,分離時 にマイクロスイッチが解放されることで初めて内部電 池から通電される仕組みになっている.つまり,分離 カメラは打ち上げから分離までの間は電源を投入でき ず,軌道上での動作テストや高性能カメラの撮像など もできない.新しいDCAM3はデジタル系を加えて複 雑化・高機能化・高性能化したため,この点はバラン スを欠く.しかしHayabusa2の中でDCAM3に与え られたリソースと開発期間では,アンビリカルケーブ ルと,それを分離前に分断する機能はどうしても追加 することができなかった. その結果, 衝突観測時の動 作を打ち上げ前に全て精密に決定して, 分離後にそれ が自動駆動されるように仕込む必要に迫られただけで なく, DCAM3の正に「1か0か」という挑戦的な特性 をより色濃いものにした. しかしそれ以上に, 打ち上 げから本番の観測までの4年間,「果たして本番でカ メラが正常に起動してくれるのか」と心臓を掴まれる 思いで心配し続けなければならないことが精神衛生上 の大きな負担になった.

DCAM3の再設計はHayabusa2の他の機器へも影響 を与えている.その一例は図4に示すSCI側面に巻き つけた拡散反射膜である.この部分はもともと多層断 熱膜(MLI)の金色の鏡面反射面だったが、これでは太 陽光の当たり方が偶然良好にならない限り宇宙空間で 真っ黒くなり、DCAM3からは視認できない.そのた めSCIの側面をベータクロス(国際宇宙ステーション 外面に使われている白色の素材)で覆うように何とか お願いすることになった.これはSCI開発責任者の佐 伯孝尚が「腹巻」と称して以降、そのように呼ばれて いる.

このような数々の課題を克服して,新しいDCAM3 は明確な理学・工学目的を達成するために改めて最適 化され,より確かな科学観測機器に生まれ変わったの である.

完成まで-木曜日の朝4時に

DCAM3の開発では、試作機やフライトモデルを製作した後の機能・性能の検証試験も大きな山場の連続だった.その理由は5つある.(a)後発のため開発期間が一般的な機器の半分だったこと,(b) DCAM3が「JAXAインテグレーション機器」であったこと,(c) ほぼ全ての電子部品が産業用グレードであったこと,(d)科学観測用カメラを持つこと,(e)コンポーネント数が多く構成が複雑だったこと、である.

それぞれについて、(a)は言わずもがな、(b)につ いて、DCAM3は一部の設計・製作に加えて組み立て や検証試験の多くを、協力メーカの手を借りずに機器 開発チームが行うことにしていた。そのため必然的に 機器担当研究者に多くの作業負荷がかかった。この方 式は小型機器の低コスト化や柔軟な開発に有効だが、 問題が発生した時の責任分担が曖昧になるため近年は

高エネルギー粒子の衝突によって、半導体内に意図しない電流パスが発生して過電流が流れる現象。多くの場合は一旦電源をOFFにすれば解消する。

^{2.}メモリ内に高エネルギー粒子が当たり、ビットの1と0が反 転する現象.



図4: DCAM3からの視認性の向上のためSCIの側面に追加され たベータクロス(黒い矢印). 通称「腹巻」.

避ける傾向にある。

恐らく今後の中型・大型の惑星探 査ではこのスタイルは無くなり、DCAM3は研究者ら が自分たちでネジを締めた最後の科学観測機器になる かもしれない. (c)から(e)は互いに関連している. (c) については前章で述べた内容に加えて、特別に設計・ 製作した光学系でも、使用したい硝材の幾つかに放射 線耐性が不明なものがあった(レンズは放射線により 着色する)ので、このための放射線耐性確認試験を行 う必要があった[4].(d).(e)について、製作後に必 要となる検証試験の数は、大雑把には「コンポーネン ト数×機能・性能・耐環境性の設計要求項目の数 | と なる. DCAM3システムは構成コンポーネントの多さ に加えて、さながら1つの超小型衛星のような機能を 持っており. さらには科学を目的とした観測に特有の 精密な性能要求があったため、試験の数は一般的な機 器の数倍に及んだ.

機器開発の多くの場合で共通ではあるが,特に DCAM3では上記の状況が相まって,開発終盤は時間 との戦いだった.その中で特に印象に残っているのは 熱真空試験である.この試験では,真空環境に晒した 機器に温度変化を与えて,所定温度での動作,温度変 化の耐性,熱設計との整合性などを確認する.とにか くスケジュールが押していたため,1時間単位で定義 した作業要求に従って24時間体制を取り,準備を含 めて1ヶ月以上の間,コンボーネントを入れ替えなが ら休みなく試験を継続した.ちょうどこの頃だったと 思うが,澤田に次回の打ち合わせを申し込んだ際,「木 曜日の朝4時なら」という返事が返って来たので快諾 したことがある.とりわけ珍しいことではないかもし



図5:熱真空試験(熱バランス試験)にて真空槽内に分離カメラを 設置した様子.

れないが、その頃のスケジュールの逼迫具合を象徴す る出来事として記憶している.試験方法も特徴的で面 白く、図5は分離カメラを真空槽の中に設置した時の 写真である.筐体表面の熱特性を検証するために宇宙 空間で浮遊した状態を模擬する必要があったので、市 販の釣り糸で吊ることを考案して試験を行った.見た 目があまりにも心臓に悪いということで、筐体の下に 落下防止のための防護ネットが取り付けられている.

最終的に、アンビリカルケーブルの心残りを除いて DCAM3の全ての製作と検証試験は問題無く完了させ ることができた.図6はDCAM3全コンポーネントの フライトモデルの写真である.開発の成果と検証試験 の結果の詳細については、アナログ系は[5]、デジタ ル系は[6]をそれぞれ参照されたい.また科学観測に 重要となるデジタル系カメラの性能検証試験の詳細な 結果は[7]にまとめた.この後、DCAM3は種子島宇 宙センターにて無事Hayabusa2の探査機本体に取り 付けられ、地上での最後の動作試験を終えて、2014 年12月3日に小惑星Ryuguに向けて打ち上げられた.

6. おわりに-挑戦的な科学観測機器

Hayabusa2が現在までに得たデータの科学的価値は 大きいが、その価値を生み出す鍵となったのは、多く が推進や姿勢制御などの探査機本体に関する工学研究 課題への取り組みだった。その中で、デジタル系を組 み入れたDCAM3は、機器のコンセプト自体に多くの リスクを抱えながらも、明確な科学目標に従ってゼロ から開発を行って、様々な技術課題を克服して成功を



図6: DCAM3システムの構成コンポーネントのフライトモデル. それぞれ「DCAM3」とあるのが分離カメラ部と分離機構, DCAM3-ANTはアナログ系受信機とデジタル系受信機を内包し,上部にアナログ系用の受信アンテナを乗せたもの, DCAM3-ANT2はデ ジタル系用の受信アンテナ, CAM-Hはサンプラホーン用のモニタカメラ, CAM-CはDCAM3システム全体のための制御ユニット でアナログ系用制御基板とデジタル系用制御基板が入っている.

収めた. 近年の観測機器の中では数少ない,新しいコ ンセプトや新しい技術開発を伴う挑戦的な機器だった と言える. その結果として,SCIと共に,世界に全く 類を見ない希少な,独創性の高い科学データを得るこ とが出来た.同時に,理学研究者が膨大な開発作業を 担当したことは,観測機器開発を担当できる次世代人 材の育成に極めて効果的だった.

惑星探査機の観測機器から得られるデータの価値や 希少性は、技術的課題を克服した先に生まれる.これ は地上の室内実験やシミュレーションなど、技術を伴 う理学研究でも同様である.国内のこれまでの固体惑 星探査の多くは、工学技術の挑戦を目的として工学研 究者が牽引しており、得られたデータの革新性や科学 的価値はそれらの努力によって担保された部分が大き い.一方で,搭載される科学観測機器の方は確実性(低 リスク)と低コストを重視する傾向にあり、特に近年 はこれが顕著である.その結果、選定される科学観測 機器は、挑戦的な要素をできるだけ排除して、過去に 宇宙実績のある機器に最低限の改良を施したものや、

あるいは国外の有力機器をそのまま導入したものが主 力になっている.また、より高いレベルの観測機器を 実現するための基礎研究、基礎開発といった活動も下 火で、それらと先端の理学研究とのコネクションも十 分ではない.このままでは、固体惑星探査における国 内の観測機器のレベルが停滞し,世界的に見劣りする ものになる.今後,探査技術が成熟していくにつれ, 特に月・火星など到達が比較的容易な領域においては, 探査機本体の技術課題は相対的に減少し,反対に新し いコンセプトや技術を伴う観測機器,過去に無い高い 性能を持つ観測機器など,挑戦的な科学観測機器が価 値の高いデータを生む鍵となって,その重要性がます ます高まることが予想される.これに対応するために は,観測機器開発に対する腰を据えた取り組みが必要 だろう.

国内では伝統的に,科学観測機器の開発の大部分を 理学研究者が担ってきた.これには賛否あるが,少な くともこの方式には,観測機器で最も重要な問いであ る「何のために,何をどのような精度で知りたいのか」 の答えが開発者自身に内在する点で大きな利点があり, その情熱が効果的に作用して,前例に無い優れた観測 機器を実現する可能性を秘めている.惑星科学研究者 コミュニティの中で上記の問題と観測機器開発の重要 性をより強く認知して,(研究室内で優れた実験装置 を構築することと同じように)理学研究の一部として その活動が活発になることを願う.それはやがて,日 本の惑星探査が世界をリードし,さらには国際協力の 中で日本が重要な役割を果たすことにも繋がる.

謝 辞

DCAM3デジタル系の立ち上げと実現は、JAXAの 故・飯島祐一さんの固体惑星科学探査にかける情熱が 結実したものである.

DCAM3デジタル系の開発は、明星電気株式会社の 奈良修さん、田中紀子さん、保坂正光さん、高橋宏さ ん、水本訓子さん、安藤享平さん、谷本和夫さんと技 術者の皆様、株式会社日放電子の技術者の皆様、光学 系の開発はフォトコーディングの池田優二さんに支え られた.通信系の開発ではJAXAの戸田知朗さん、川 原康介さんに多くのご支援を頂いた、カメラ性能試験 ではJAXA誘導・制御グループの皆様にご協力頂いた. 環境試験ではJAXAの星野健さん、坂本和敏さんに ご協力を頂いた.DCAM3デジタル系の搭載と運用は 多くのHayabusa2プロジェクトメンバのご協力で成 し得たものである.皆様に深く感謝申し上げたい.

参考文献

- [1] Saiki, T. et al., 2017, Space Sci. Rev. 208, 165.
- [2] 荒川政彦 ほか, 2013, 日本惑星科学会誌 22, 152.
- [3] Arakawa, M. et al., 2017, Space Sci. Rev. 208, 187.
- [4] 石橋高 ほか, 2016, 宇宙科学研究所報告, JAXA-RR-15-005.
- [5] Sawada, H. et al., 2017, Space Sci. Rev. 208, 143.
- [6] Ogawa, K. et al., 2017, Space Sci. Rev. 208, 125.
- [7] Ishibashi, K. et al., 2017, Space Sci. Rev. 208, 213.

遊星百景 その17 ~スプートニク平原~ 鎌田 俊一1

「生き方や内面はその人の顔に出る」などと言われ ますが、これは固体天体についてもよく当てはまりま す. つまり、地形からはその天体の歴史や内部構造に 関する情報を得ることができます. 今回は、「これで もか!」というほど多様な情報をもたらしてくれた、冥 王星のスプートニク平原を取り上げます.

スプートニク平原は冥王星の「白いハート」の左半 分にあたり,1300×900 km 程度の楕円型の地域です (図1左). 冥王星の大部分は他の氷天体と同様に多数 の衝突クレータで覆われていますが,この平原だけは 例外です(図2)[1]. 衝突クレータは一つも確認されず, 代わりに細く浅い溝が多数走り,特徴的な多角形模様 をつくっています.この平原は柔らかい固体窒素で覆 われていることから[2],それが対流することで衝突 クレータが消し続けられていると同時に多角形模様を 形成していると考えられています[3].

周囲と比較してこの平原に大量の窒素が蓄積してい ることから,大気進化に関する示唆が得られます. 冥 王星は窒素を主体とする薄い大気(表面気圧は~10 μ bar)を持っており,昇華によって地表と大気の間で物 質交換が起きていますが,固体窒素で覆われたスプー トニク平原はまさに中心的役割を果たす場所です. こ のスプートニク平原は,実は巨大な盆地になっていま す(図1右).このことから,冥王星ではこの盆地の上 空で選択的に「窒素の雪」が降り続けていることが示 唆されます[4,5]. 直感的には降雪は盆地ではなく山で 起こるように思いますが,これは冥王星の大気が非常 に薄く対流圏が発達していないことが原因と考えられ ています[4].

また、スプートニク平原が巨大な盆地であることとそ の位置から、内部構造に関する示唆が得られます. こ の巨大盆地は、赤道、しかも衛星カロンとの潮汐軸の 近くに存在しています(図1左). 盆地というのは周囲 に比べて物質が少ないわけですから、そこでの重力は 周囲に比べて小さくなると思われます。しかしそのよ うな重力分布を持つと自転が不安定になり、盆地が極 に向かうように天体が回転してしまいます. このよう な回転は「真の極移動」と呼ばれ、どの天体でも起こ ると考えられており、 冥王星も例外ではありません. ということは、この巨大盆地では重力は弱いのではな く強いのです、この「強い重力を持つ盆地」というのは、 実は月でも多数見つかっており、「マスコン盆地」と 呼ばれています、このことが、内部構造についての情 報を与えてくれます、つまり、地下には分厚い海があ り、しかも盆地の下では内部海が分厚く、逆に内部海 の上にある氷地殻は薄くなっていると考えられるので す[5.6]. そして、そのような内部構造を長期間維持す るためには、氷地殻と内部海の間にガスハイドレート の薄い層が必要なことも分かってきました[7]. さらに, この地下のガスハイドレート層がメタンや一酸化炭素 の貯蔵庫となることで、極端に窒素に富んだ表層と大 気を作り出していることも分かってきました[7]. このように大気・表層・内部の歴史を教えてくれるス プートニク平原は、まさに「冥王星の生き方と内面を 映した顔 | と言えるのではないでしょうか.

引用文献

- [1] Stern, S. A. et al., 2015, Science 350, aad1815.
- [2] Grundy, W. M. et al., 2016, Science 351, aad9189.

^{1.} 北海道大学大学院理学研究院 kamata@sci.hokudai.ac.jp



図1:スプートニク平原の特徴.(左)見た目(カラー強調).スプートニク平原は「白いハート」の左半分に相当し,その中 心はカロンとの潮汐軸付近に存在する.(テクスチャ画像:NASA/JHUAPL/SwRI)(右)地形図.スプートニク平原 は巨大な盆地になっている.



図2:スプートニク平原. 衝突クレータは一つもなく,代わりに対流セル模様が見えている. (PIA20007. NASA/JHUAPL/SwRI)

- [3] McKinnon, W. B. et al., 2016, Nature 534, 82.
- [7] Kamata, S. et al., 2019, Nat. Geosci. 12, 407.
- [4] Bertrand, T. and Forget, F., 2016, Nature 540, 86.
- [5] Keane, J. T. et al., 2016, Nature 540, 90.
- [6] Nimmo, F. et al., 2016, Nature 540, 94.